

# 煤矿冲击地压监测预警技术新进展

刘 金 海

(华北科技学院 河北省矿井灾害防治重点实验室,北京 101601)

**摘 要:**为促进冲击地压监测预警水平的提高和监测预警新技术的推广,阐述了 6 种冲击地压监测预警技术分类方法及相应分类结果,探讨了冲击地压监测预警在监测参量、预警阈值、测点布置、数据分析等 4 个方面存在的困难,指出了冲击地压监测预警在监测范围、监测参数、监测方式、预警参量等 4 个方面的技术要求,分析了震动场、应力场联合监测技术和“全频广域”震动监测技术,最后介绍了“全频广域”震动监测技术应用案例。结果表明,震动场、应力场联合监测技术和“全频广域”震动监测技术在监测范围、监测参数、监测方式和预警参量等方面能够满足冲击地压监测预警技术要求,具有广阔的应用前景。

**关键词:**冲击地压;监测预警;多参量;全频广域

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)06-0071-07

## New progress on monitoring and early warning technology of mine strata pressure bump

Liu Jinhai

(Hebei Provincial Key Lab of Mine Disaster Prevention and Control, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

**Abstract:** In order to promote the monitoring and early warning level improvement and the new technology promoting of the monitoring and early warning technology for the mine strata pressure bump, the paper stated the classification method and relevant classification results of the six pressure bump monitoring and early warning technologies, discussed problems existed in the monitoring parameters, early warning threshold value, monitoring point layout and data analysis and pointed out the technical requirements in the monitoring scope, monitoring parameters, monitoring method and early warning parameters of the mine strata pressure bump. The paper had an analysis on the combined monitoring technology of the seismic filed and stress field and the monitoring technology of full frequency wide range seismic. Finally, the paper introduced the application cases of the full frequency wide range seismic monitoring technology. The results showed that the combined monitoring technology of the seismic field and the stress field and the monitoring technology of full frequency wide range seismic could meet the monitoring and early warning technology requirement of the mine strata pressure bump on the monitoring range, monitoring parameters, monitoring method and early warning parameters and would have a wide application prospect.

**Key words:** mine strata pressure bump; monitoring and early warning; multi parameters; full frequency wide range

## 0 引 言

冲击地压是我国深部开采矿井面临的主要动力灾害之一<sup>[1-3]</sup>。我国首例冲击地压于 1933 年在抚顺胜利煤矿,距今已有 83 年,期间我国学者围

绕冲击地压发生机理、危险性评价方法与技术、防治技术及机具、监测技术与装备进行了持续深入研究。总体上我国冲击地压矿井数量在不断增加(如由 1990 年的 58 个增加到 2015 年的 150 个<sup>[4]</sup>),冲击地压矿井覆盖省份在不断增多(由原来的辽宁、北

收稿日期:2016-03-17;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2016.06.011

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504096);河北省自然科学基金资助项目(E2015508050);河北省高等学校科学技术研究资助项目(QN2014329);河北省矿井灾害防治重点实验室开放课题资助项目(KJZH2014K02)

作者简介:刘金海(1982—),男,河南扶沟人,副教授,博士。E-mail:jh\_liu1982@163.com

引用格式:刘金海.煤矿冲击地压监测预警技术新进展[J].煤炭科学技术,2016,44(6):71-77.

Liu Jinhai. New progress on monitoring and early warning technology of mine strata pressure bump[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 71-77.

京、江苏、山东、河南等5个省份逐渐扩展到黑龙江、陕西、内蒙古、新疆等10余个省(自治区),冲击地压矿井涵盖条件逐渐普遍化,如开采深度由300 m至1 500 m,顶板由700 m巨厚基岩到700 m巨厚表土,煤层厚度为1~12 m,煤层倾角 $0^{\circ}\sim 87^{\circ}$ ,工作面倾斜长度由30 m到270 m,都发生过冲击地压灾害。近10年来,我国学者和现场工程技术人员在与冲击地压灾害防治积累了一些宝贵经验,尤其在冲击地压监测预警方面获得了一些具有自主知识产权的成果<sup>[5-10]</sup>。监测预警作为冲击地压防治的重要环节之一,提醒现场施工人员及时实施防护措施。冲击地压监测的实时性和预警的可靠性决定着现场施工人员能否及时准确发现冲击危险信息。近年来冲击地压监测预警技术的发展也主要集中在监测的实时性和预警的可靠性2个方面<sup>[11-13]</sup>。笔者集中介绍了冲击地压监测预警技术新进展,期望通过交流共同促进新技术的推广应用,从而实现煤矿冲击地压灾害有效防治的目的。

## 1 冲击地压监测预警技术分类

### 1.1 按监测物理量分类

按监测物理量不同,冲击地压监测预警技术主要分为钻屑类监测技术、电磁类监测技术、电荷类监测技术、应力类监测技术和震动类监测。钻屑类监测技术根据煤层钻孔过程中排出的煤粉量和动力效应,判断应力集中程度与位置,进而预测冲击地压危险性。为克服钻屑类监测技术在定量化方面的不足,徐连满等<sup>[14]</sup>提出通过测试钻孔过程中钻机对钻杆输出转矩的大小来判断冲击地压危险性的方法(即钻杆转矩法);姜福兴等<sup>[4]</sup>基于“当量钻屑法”原理开发了冲击地压实时监测预警系统(即应力监测技术);何学秋等<sup>[7-8]</sup>根据受载煤体非均匀变形引起电荷迁移或裂纹扩展过程中带电粒子变速运动向外辐射电磁能量的特点,提出冲击地压的电磁辐射监测技术,即通过监测煤层变形过程中向外辐射的电磁能量进而对冲击地压进行预警;潘一山等<sup>[6]</sup>根据煤岩变形破裂过程产生大量电荷及冲击地压发生时的电荷辐射信号特征,研制了电荷辐射监测系统。应力类监测技术是通过实时直接或间接监测煤层应力变化趋势对冲击地压危险性进行预警的一种方法。震动监测是通过记录煤岩体变形及破裂过程中震动信息<sup>[15]</sup>,分析震动信息与冲击地压的相关性,进而判断冲击地压发生的可能性,如地音监测就是

震动监测技术中的一种。钻屑量、电磁辐射能量、电荷辐射量、地音都属于煤体应力状态的表征,因此,钻屑法、电磁辐射法、电荷辐射法、地音法都属于间接式应力监测技术。

### 1.2 按监测连续性分类

按监测连续性不同,冲击地压监测预警技术可分为间断性监测、连续性监测和触发性监测。钻屑法及钻杆转矩法都属于间断性监测技术,只能在实施钻孔过程中对当前的煤层应力状态进行监测,钻孔结束时冲击地压监测也随之结束。电磁辐射、电荷辐射、应力等监测方法目前都可实现连续性监测,并可根据具体要求调整巡回间隔时间。震动类监测技术多采用触发式监测模式,先通过监测软件设置触发条件,然后通过判断采集的信号是否满足触发条件,进而确定是否记录震动事件数据。震动类监测一般通过3个步骤:传感器接收煤岩体破裂产生的震动信号(如速度、加速度等),并将其转换成模拟电信号(电压或电流);数据采集器采集来自传感器的模拟电信号,并将之转换成数字信号;监测软件通过对数字信号进行触发运算,判断是否记录震动事件数据。

### 1.3 按测点与信息点接触方式分类

按测点与信息点的接触方式不同,冲击地压监测预警技术可分为接触式监测和非接触式监测。监测测点是监测传感器布置点,信息点是监测物理量变化点。钻屑、钻杆转矩、应力等监测技术的测点与信息点接触,测点得到的数据反映的是与测点接触煤体的应力状态。电磁辐射、电荷辐射、震动监测的传感器不与信息点接触,都属于非接触式监测技术。电磁辐射、电荷辐射的传感器布置在巷道内,而信息点位于煤层内,反映的是煤层应力状态;震动监测传感器虽然直接或间接地布置在岩体中,但接收到的震动信号来自煤岩体内破裂处,测点与信息点相距几米至几百米。从测点与信息点的接触方式可以看出,钻屑、钻杆转矩、应力监测覆盖的范围最小,电磁辐射、电荷辐射监测覆盖的范围较大,震动监测覆盖的范围最大。

### 1.4 按测点布置方式分类

按测点布置方式不同,冲击地压监测预警技术可分为“一”形线监测、“川”形面监测、“•”或“∴”形体监测。钻屑法、钻杆转矩法的测点随钻进深度向钻孔内移动,所有测点连起来是一条直线(图1a),称为“一”形线监测。煤层应力监测测点一般

布置在钻孔内,每个钻孔布置2~3个传感器,连续布置多个钻孔,数据采集器同时采集所有测点的数据,并通过测点间插值形成应力云图,而再整体看连续多个钻孔像“川”字(图2),故称为“川”形面监测。电磁辐射、电荷辐射、地音的测点是孤立的,但信息点是广泛的,即其传感器监测范围可以覆盖一

个小的立方体,属于“•”形体监测。矿震、微震等监测系统一般通过布置多个传感器联合定位震动事件位置和计算震源能量,测点多,但信息点更多,监测范围可以覆盖1个大的立方体(图3),属于“::”形体监测。

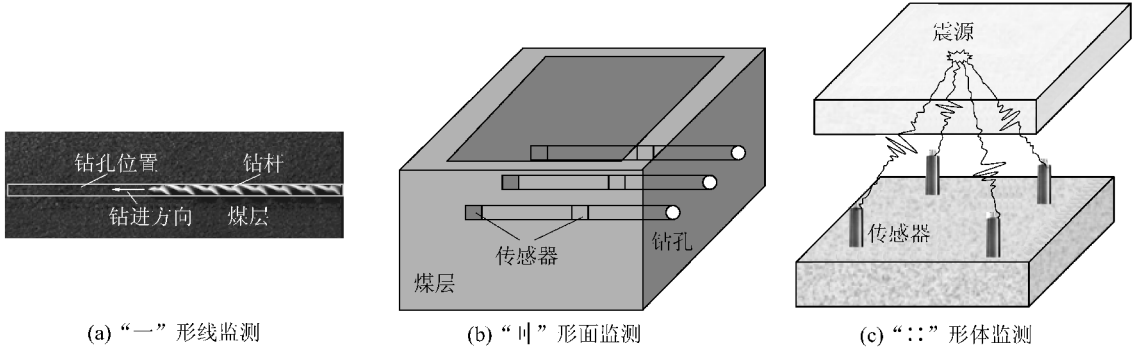


图1 测点布置方式

Fig. 1 Arrangement of measuring points

1.5 按监测震动频带分类

当前现场应用的震动类监测设备主要有地震(矿震)监测系统、微震监测系统、地音监测系统。而根据监测频带宽度不同,这些震动类监测设备可分为低频地震(矿震)监测系统、中低频微震监测系统、中高频微震监测系统和高频地音监测系统。低频地震(矿震)监测系统的监测频带一般为0.5~60 Hz,现场使用的有矿山地震监测系统和矿震监测定位系统。中低频微震监测系统的监测频带分为1~150 Hz和1~600 Hz两种,现场使用较多的有引自波兰的SOS微震监测系统(1~600 Hz)、ARAMIS微震监测系统(1~150 Hz)和我国自主研发的KJ768自振式微震监测系统。中高频微震监测系统的监测频带为60~1 500 Hz,现场应用较多的是KJ551微震监测系统。高频地音监测系统的监测频带一般为几百至数千赫兹,现场广泛应用的有引自波兰的SAK、ARES-5/E地音监测系统。震动类监测系统的可监测范围和记录事件能量与频带宽度负相关,如地震(矿震)监测系统的监测范围可覆盖整个矿区,但记录事件的里氏震级一般大于0.5级;中低频微震监测系统的监测范围可覆盖整个矿井,但记录事件的能量在10<sup>2</sup> J以上;中高频微震监测系统的监测范围一般为数百米,记录事件的能量一般为1~10<sup>5</sup> J,主要用于工作面冲击危险性监测;地音监测系统的监测范围一般为数10 m以下,记录事件能量在10<sup>2</sup> J以下,主要用于局部冲击危险性监测。各震动

监测系统的适用监测区域如图2所示。

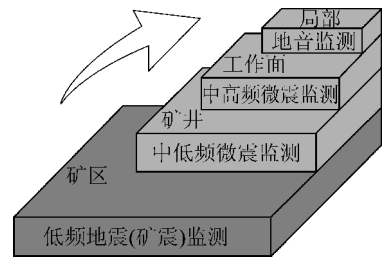


图2 震动类监测系统适用监测区域

Fig. 2 Seismic monitoring system for monitoring area

1.6 按前端信号传输方式分类

实时性、连续性是冲击地压监测系统实现冲击危险及时预警的必然要求。冲击地压监测技术的实时性、连续性要求依托可靠的信号传输方式。实时冲击地压监测系统的信号传输一般分为2部分:一是传感器接收到的信号传输至采集器,二是采集器采集到的数据传输至监控主机。后者属于后端信号传输,由于传输距离长,一般采用光缆或电话线;前者属于前端信号传输,传输距离较短,一般采用电缆通信方式或无线射频方式。因此,按前端信号传输方式不同,冲击地压监测预警技术可分为无线监测技术和有线监测技术。

2 冲击地压监测预警面临的问题

冲击地压监测预警面临的问题主要体现在以下4个方面:

1) 发生机理的复杂性与监测物理量的单一性不匹配。从宏观上看,诱发冲击地压的因素有构造(断层、褶曲、相变等)、顶板破断、煤柱、采掘扰动等;从力源上看,诱发冲击地压的力源有应力、震动等;从载荷类型看,诱发冲击地压的载荷包括取决于埋深、构造的静载和来自顶板破断、构造活化、煤柱失稳、放炮的动载;从发生过程看,冲击地压分为瞬时性冲击和滞后性冲击。可见,诱发冲击地压的因素是多方面的,冲击地压机理具有复杂性。而现场广泛采用的监测技术都是基于单一物理量开发的,不能与冲击地压发生的复杂机理匹配。因此,仅监测某一物理量的变化规律,难以满足冲击地压预警要求。

2) 监测手段的多样性与预警指标阈值的不确定性不匹配。为克服单一物理量监测技术的不足,现场安装多套监测设备,采用组合预警方式,如电磁辐射监测与微震监测组合、应力监测与微震监测组合、地震监测与微震监测组合、地音监测与微震监测组合等。由于每套监测设备都需要设置相应的阈值才能对冲击地压进行预警,而预警指标的阈值具有不确定性,导致现场出现个别监测设备错误预警或不预警的现象。因此,现场即使安装多套冲击地压监测设备,若不能准确确定相应的预警值,也不能起到良好的预警作用。

3) 破坏方式的多样性与监测布点的确定性不匹配。通过对多个冲击地压事故现场进行勘察,发现冲击地压破坏方式主要有巷道帮部冲击、巷道顶板冲击、巷道底板冲击、采场煤壁冲击、采场底板冲击、冲击气浪、强烈震动等。冲击位置和方式与冲击力源之间具有相关性,巷道帮部及采场煤壁冲击的力源主要来自垂直应力,巷道顶底板或采场底板冲击的力源主要来自水平应力,而冲击气浪主要是冲击煤体压缩空间形成的,强烈震动主要来自构造活化、煤柱失稳、顶板断裂等。而现场应力测点主要布置巷道帮部,微震主要监测采场超前区域的震动事件。因此,现场监测布点的确定性与冲击破坏方式的多样性不匹配,导致现场监测预警效果不理想。

4) 监测数据的庞杂性与危险信息反馈的及时性不匹配。危险信息及时反馈决定着冲击地压预警的可靠性。某些矿井由于现场监测设备类型多,监测数据庞杂,数据分析量大,危险信息反馈滞后,出现预警滞后的现象。可见,监测设备不是越多越好,冲击地压有效预警的关键是合理组合监测系统,快

速准确分析有效监测数据,及时反馈危险信息。

### 3 冲击地压监测预警技术要求

#### 3.1 “区域性覆盖、局域性聚焦”的监测范围要求

对于深部开采矿井,潜在冲击危险块段多,而采掘影响区域又相对集中;对于某一采掘工程的某一时段,存在已有采矿地质因素诱发的静态危险区和采掘活动诱发的动态危险区;对于某一冲击危险块段,存在诱发冲击地压的近场因素和外场因素,也存在近场因素和外场因素各自诱发或叠加诱发冲击地压的可能性<sup>[16]</sup>。因此,冲击地压监测预警技术应满足“区域性覆盖、局域性聚焦”的监测范围要求,即能够对潜在的危险区进行监测,又能够对重点危险区域进行聚焦式监测,从而达到覆盖不同程度的危险区,实现临场预警和外场预警的目的。

#### 3.2 “多参量”的监测参数要求

监测参数单一造成冲击地压预警准确率低的的重要原因之一。监测参数应覆盖所有诱发因素致冲的媒介,如一些因素是通过震动诱发冲击地压,对于这些因素应该开展震动监测,还有一些因素是通过促使应力演化诱发冲击地压,对于这些因素应开展应力监测。纵观现有冲击地压监测技术,监测参数可分为应力和震动两类,如钻屑、钻杆转矩、电磁辐射、电荷辐射、地音、应力等监测的本质物理量都是应力变化,地震(矿震)、微震监测的本质物理量都是震动。因此,冲击地压监测技术应包含应力、震动等2个参数,实现多参量的监测参数要求。

#### 3.3 “在线、实时”的监测方式要求

冲击地压防治的关键是及时对冲击危险进行预警,而及时预警要求采用在线、实时的监测方式,即监测数据采集和传输连续化、实时化,监测数据处理在线化。原来广泛采用的钻屑法由于不能满足“在线、实时”的监测方式要求,正逐渐被基于“当量钻屑量”原理的应力监测技术所代替。近年来发展起来的光纤通信技术和高速矿井环网技术为实现冲击地压“在线、实时”监测提供了基础<sup>[17]</sup>。

#### 3.4 “时-空-强”的预警参量要求

可靠的冲击地压监测预警技术应能够实现“监测范围广,监测时间长,预警准确性高”,即能够实现多层次预测:某一时间区域横向上的预测;某一区域时间纵向上的预测;某一区域某一时间危险级别上的预测。因此,冲击地压监测技术的预警参量应包括时间(不是绝对时间,而是相对于采掘施工的

时间)、空间(具体区域)、强度(危险程度),从而准确预测“什么时间、什么地点、什么级别”的冲击地压。

## 4 冲击地压监测预警技术新进展

### 4.1 震动场、应力场联合监测技术

冲击地压可分为“自发型”和“诱发型”2类,其中“自发型”冲击地压属于煤体的“渐进性”失稳,其力源是近场应力,“诱发型”冲击地压属于煤体的“触发性”失稳,其根本力源是远场震动。诱发“自发型”冲击地压的应力是逐渐积聚的,具有明显的过程,导致“诱发型”冲击地压的震动是瞬间的,其对煤体应力作用时间短暂。可见,两类冲击地压各自突出的物理量分别是应力场、震动场。因此,开展震动场、应力场联合监测是实现冲击地压有效监测预警的关键。震动场、应力场联合监测技术的内涵<sup>[18]</sup>:同时开展应力监测、震动监测;分别监测应力变化和震源位置;实现冲击地压的临场预警和区域预警;实现冲击地压的“时-空-强”预警。

冲击地压“动静叠加原理”认为<sup>[19]</sup>,采掘区域周围煤层中的静载荷与矿震形成的动载荷叠加超过冲击临界载荷是冲击地压发生的根本原因。因此,准确监测采掘区域周围煤层中动、静载荷叠加值是实现冲击地压有效监测预警的基础。窦林名等<sup>[10]</sup>基于震动波传播速度与煤岩应力的相关性,研发了震动波CT技术,选择波速异常与波速梯度异常作为冲击地压预警指标。震动波CT技术通过一种监测手段(微震),达到了震动场、应力场联合监测目的,并得到由震动场到应力场的递进结果,实现了监测参数的“多参量”和归一化。

### 4.2 “全频广域”震动监测技术

冲击地压发生过程可描述为:冲击煤体微破裂→裂缝扩展→局部失稳→结构破坏→冲击失稳。各个阶段产生的前兆震动信息都不相同。因此,实现冲击地压发生过程的全程震动监测是开展冲击地压监测预警的有效途径之一。为此,提出2种分别适用于回采工作面、掘进工作面冲击地压监测的“全频广域”震动监测技术。

1)区域性“全频广域”震动监测技术。该技术通过组合中高频微震监测系统、中低频微震监测系统和低频矿山地震监测系统,达到全频(震动事件频率由低到高)广域(监测范围:工作面→矿井→矿区)监测目的。新巨龙公司“全频广域”震动监测画

面如图3所示,KJ551微震监测系统用于监测中高频震动事件,覆盖范围为数百米,起到局部震动监测作用;ARAMIS微震监测系统用于监测中低频震动事件,覆盖范围数千米,起到区域震动监测作用;KJ874矿山地震监测系统用于监测低频震动事件,覆盖范围达数万米,起到矿区震动监测作用。



图3 新巨龙公司“全频广域”震动监测画面

Fig. 3 All frequency and wide-area vibration monitoring in Xinjulong Company

2)局域性“全频广域”震动监测技术。基于掘进工作面扰动小、震动能量小的特点,通过组合地音监测系统和高频微震监测系统,形成针对性较强的局域性“全频广域”震动监测系统(图4)。其中,地音监测系统用于监测掘进工作面周围微破裂引起的微弱震动信号,记录对应通道产生的时间和幅值,起到判别煤体应力变化趋势和预测微震事件的作用;中高频微震监测系统用于监测掘进工作面周围微震信号和中等破裂诱发的冲击地压震动信号。应用局域性“全频广域”震动监测技术,可起到掘进工作面震动场与应力场的联合监测和全频(震动事件频率由中频到高频)广域(监测范围:掘进工作面→巷道围岩)监测作用。

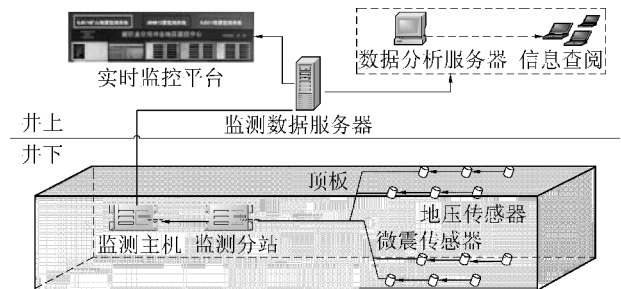


图4 局域性“全频广域”震动监测

Fig. 4 Local allfrequency and wide-area vibration monitoring

## 5 应用案例分析

目前震动场、应力场联合监测技术已在全国冲击地压矿井进行了推广应用,众多冲击地压矿井所属能源公司及属地行业监管机构出台了相关规定。在此,仅介绍“全频广域”震动监测技术的应用。

新巨龙公司分别于2010年、2014年、2015年安

装 KJ551 微震监测系统、ARAMIS 微震监测系统和 KJ874 矿山地震监测系统,并于 2015 年 3 月调试形成“全频广域”震动监测技术体系,实现宽频(0.5~1 500 Hz)、广域(回采工作面→矿井→矿区)监测目的。运行 1 年来,采用“全频广域”震动监测技术有效记录了矿区周围的地震事件、矿区范围内的冲击地压事件、矿井范围内的矿震事件与爆破事件、工作面区域的岩层破裂事件与构造活化事件。2015 年 7 月 29 日 2 时 45 分记录的一次冲击地压事件波形如图 5 所示。图中 D1、D2 为台站序号,UD、EW、NS 分别代表垂直、东西、南北。此次冲击地压发生在距新巨龙公司约 14 km 的赵楼煤矿 1305 工作面,经计算此次冲击地压的震级为 2.3 级,造成井下设备严重受损(图 6)。

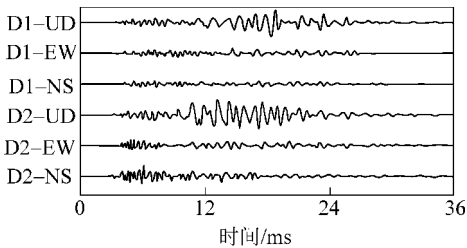


图 5 冲击地压波形

Fig. 5 Wave figure of pressure bump



图 6 冲击地压破坏情况

Fig. 6 Damage caused by pressure bump

## 5 结 语

1) 冲击地压监测预警面临的问题主要体现在发生机理的复杂性与监测物理量的单一性不匹配、监测手段的多样性与预警指标阈值的不确定性不匹配、破坏方式的多样性与监测布点的确定性不匹配、监测数据的庞杂性与危险信息反馈的及时性不匹配等 4 个方面。

2) 有效的冲击地压监测预警技术应满足“区域性覆盖、局域性聚焦”的监测范围要求、“多参量”的监测参数要求、“在线、实时”的监测方式要求和“时-空-强”的预警参量要求。

3) 新发展起来的震动场、应力场联合监测技术

和“全频广域”震动监测技术能够适应冲击地压监测的技术要求,有着广阔的应用前景。

## 参考文献 (References):

- [1] 姜福兴,魏全德,姚顺利,等.冲击地压防治关键理论与技术分析[J].煤炭科学技术,2013,41(6):6-9.  
Jiang Fuxing, Wei Quande, Yao Shunli, et al. Key theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 1-4.
- [2] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.  
Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [3] 齐庆新,李晓璐,赵善坤.煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J].煤炭科学技术,2013,41(6):1-5.  
Qi Qingxin, Li Xiaolun, Zhao Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 1-5.
- [4] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.  
Lan Hang, Chen Dongke, Mao Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [5] 姜福兴,杨淑华,成云海,等.煤矿冲击地压的微地震监测研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1511-1516.  
Jiang Fuxing, Yang Shuhua, Cheng Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511-1516.
- [6] 潘一山,赵扬锋,官福海,等.矿震监测定位系统的研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):1002-1011.  
Pan Yishan, Zhao Yangfeng, Guan Fuhai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1002-1011.
- [7] 潘一山,赵扬锋,李国臻.冲击地压预测的电荷感应技术及其应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3988-3993.  
Pan Yishan, Zhao Yangfeng, Li Guozhen. Charge-induced technique of rockburst prediction and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3988-3993.
- [8] 何学秋,聂百胜,王恩元,等.矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术[J].煤炭学报,2007,32(1):56-59.  
He Xueqiu, Nie Baisheng, Wang Enyuan, et al. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mine [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 56-59.
- [9] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等.煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J].煤炭学报,2003,28(4):366-369.  
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang, et al. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its appli-

- ation[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 366-369.
- [10] 齐庆新,孔令海,欧阳振华,等.自震式微震监测系统与方法:中国,ZL201410370547[P].2014-10-15.
- [11] 窦林名,牟宗龙,李振雷,等.煤矿冲击矿压监测预警与防治研究进展[J].煤矿支护,2015(2):17-26.  
Dou Linming, Mou Zonglong, Li Zhenlei, *et al.* Research progress of monitoring and early warning and prevention of coal bump[J]. Journal of China Coal Society, 2015(2):17-26.
- [12] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等.我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2013,41(6):21-25.  
Pan Junfeng, Mao Debing, Lan Hang, *et al.* Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in China[J]. Mining Technology, 2013, 41(6):21-25.
- [13] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.  
Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):205-213.
- [14] 徐连满,李祁,潘一山,等.钻杆转矩法预测冲击地压的研究[J].工程力学,2014,31(11):251-256.  
Xu Lianman, Li Qi, Pan Yishan, *et al.* Study on forecasting rockburst of the drill pipe torque method[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(11):251-256.
- [15] 谭云亮,李芳成,周辉,等.冲击地压声发射前兆模式初步研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(4):425-428.  
Tan Yunliang, Li Fangcheng, Zhou Hui, *et al.* Analysis on acoustic emission pattern for rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4):425-428.
- [16] 潘俊锋,秦子哈,王书文,等.冲击危险性分源权重综合评价方法[J].煤炭学报,2015,40(10):2327-2335.  
Pan Junfeng, Qin Zihan, Wang Shuwen, *et al.* Preliminary study on early warning method based on weight comprehensive and different-load sources of coal bump[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10):2327-2335.
- [17] 尹永明,姜福兴,朱权洁.掘进面冲击地压实时无线监测预警技术[J].煤矿安全,2014,45(3):87-91.  
Yin Yongming, Jiang Fuxing, Zhu Quanjie. Rockburst real-time wireless monitoring and early warning technology in heading face[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(3):87-91.
- [18] 刘金海,翟明华,郭信山,等.震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用[J].煤炭学报,2014,39(2):353-363.  
Liu Jinhai, Zhai Minghua, Guo Xinshan, *et al.* Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):353-363.
- [19] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.  
Dou Linming, He Jiang, Cao Anye, *et al.* Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1469-1476.

## (上接第63页)

- with compound roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5):987-995
- [13] 柏建彪,侯朝炯,杜木民,等.复合顶板极软煤层巷道锚杆支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(1):53-56.  
Bai Jianbiao, Hou Chaojiong, Du Mumin, *et al.* Study on bolting support of roadway in extremely soft seam of coal mine with complex roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1):53-56.
- [14] 余伟健,王卫军,张农,等.深井煤巷厚层复合顶板整体变形机制及控制[J].中国矿业大学学报,2012,41(5):725-732.  
Yu Weijian, Wang Wei Jun, Zhang Nong, *et al.* Study of global deformation and control of a thick layered compound roof in a deep well[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(5):725-732.
- [15] 杨峰,王连国,贺安民,等.复合顶板的破坏机理与锚杆支护技术[J].采矿与安全工程学报,2008,25(3):286-289.  
Yang Feng, Wang Lianguo, HE Anmin, *et al.* Failure mechanism and bolting support technique of complex roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3):286-289.
- [16] 李红,祝连庆,刘锋,等.裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J].仪器仪表学报,2014,35(8):1744-1750.  
Li Hong, Zhu Lianqing, Liu Feng, *et al.* Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1744-1750.
- [17] 张桂花,柴敬,李毅,等.基于光纤光栅拉拔实验锚杆应力分布研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):635-638.  
Zhang Guihua, Chai Jing, Li Yi, *et al.* On stress distribution of bolt in pullout test based on FBG[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4):635-638.